

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2023.04.009

# 基于电压行波陡度的柔性直流送出线路快速保护方案

高正创, 李凤婷, 解超, 尹纯亚

(新疆大学电气工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830017)

**摘要:** 柔性直流技术在灵活解决高比例新能源消纳的问题上具有革命性意义。针对传统线路保护已不能可靠适应柔性直流送出系统高比例电力电子设备脆弱性、故障信息提取难等问题, 文中提出一种基于电压行波陡度的柔性直流送出线路快速保护方案。通过分析直流线路故障暂态特性, 利用限流电抗器两侧故障电压行波陡度与极性的不同, 增加了有效暂态信息量提取范围, 实现区内外故障识别; 利用故障极与健全极的电压行波变化程度存在明显差异, 判别故障类型; 同时考虑了雷击干扰并利用其初始变化特性提出了快速识别方法。最后通过仿真验证了该保护方案在各种影响因素下的性能, 可以快速可靠地识别故障, 具有良好的灵敏性和抗干扰能力。

**关键词:** 柔性直流; 暂态信息量; 电压行波陡度; 电压行波极性; 雷击干扰; 灵敏度

**中图分类号:** TM773

**文献标志码:** A

**文章编号:** 2096-3203(2023)04-0084-10

## 0 引言

随着节能减碳、能源转型的推进, 我国新能源产业迅速发展<sup>[1-4]</sup>。新能源项目工程规模不断扩大, 其间歇性和不稳定性的缺点也给安全输电带来了问题。柔性直流输电具有低谐波、大容量、运行灵活、互联方便、无换相失败等优势, 备受青睐<sup>[5-7]</sup>。与传统交流系统和常规直流系统相比, 柔性直流系统阻尼小、惯量低、非线性强, 各种传统保护方案已不完全适用<sup>[8-9]</sup>。因此, 需要快速有效的保护方案识别出柔性直流送出线路故障, 保障柔性直流系统的安全稳定运行。

现有柔性直流线路保护方案根据保护原理可分为单端量保护<sup>[10]</sup>和双端量保护<sup>[11]</sup>。文献[12]提出通过比较两端暂态阻抗的大小来判断故障; 文献[13-14]均利用小波变换得到的两端电压幅值比和两端等效行波信息构成线路保护。以上双端量保护方案存在通信延时的问题, 难以满足柔性直流线路保护的速动性要求, 适用于短距离直流线路。

基于单端量的线路保护方案不受通信影响, 动作时间快, 可分为频域法<sup>[15-16]</sup>和时域法<sup>[17-20]</sup>。文献[15]依据电压高频分量的大小判断故障类型, 但该保护方案受过渡电阻影响较大。文献[16]通过小波变换的信号处理方法, 提出一种基于初始电压行波衰减速率的线路保护方案, 提高了暂态量保护的可靠性。文献[17-18]利用电压变化量构造线路保护方法, 易于工程实现, 有较好的速动性, 但未考虑雷击干扰影响。文献[19]讨论了直流线路近端和

远端电流传输特性, 提出一种两段式过电流保护方案, 能可靠判别故障。文献[20]利用零模、线模电压反行波传输的时差, 提出一种基于反行波的保护方案, 但在发生双极短路故障且只存在线模分量时无法识别。而柔性直流系统中电力电子器件闭锁快, 故障信息难以准确提取, 因此有学者提出采用注入信号的方式解决该问题<sup>[21]</sup>。文献[22-23]通过向非故障极模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)注入信号, 检测第一个反行波上升沿进而确定故障类型, 但实现比较困难。

受自然环境因素的影响, 长距离输电线路容易遭受雷电干扰, 因此柔性直流线路保护方案有必要考虑雷击干扰。文献[24]提出一种利用模极大值结合尾波拟合的快速雷击识别的保护方法。文献[25]提出采用高低频分量的能量比来区分雷击干扰的保护方法, 该方法对采样频率要求较高。

为此, 文中从柔性直流送出线路故障暂态特性着手, 推导限流电抗器两侧故障电压行波幅值, 并分析了其线路传播特性, 得出故障电压行波陡度与极性特征。基于此分析并结合雷击行波初始变化特性, 提出一种基于电压行波陡度的快速保护方案。该方案扩大了暂态信息量提取范围, 能可靠识别故障类型和雷击干扰, 具有较高灵敏性和速动性, 且便于实现。在PSCAD/EMTDC中搭建柔性直流送出系统模型, 验证了所提方案的保护性能。

## 1 直流送出线路故障分析

图1为柔性直流送出系统的某条送出线路拓扑, 采用真双极的接线方式, 并通过金属回线引出接地极。该接线方式下, 当发生单极接地故障时直

收稿日期: 2022-12-29; 修回日期: 2023-03-30

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2021YFB1507000)

流送出系统仍可正常输电。送出线路选用架空线,线路两侧配有限流电抗器及直流断路器等保护装置,用于保护柔性直流送出系统的安全稳定运行。

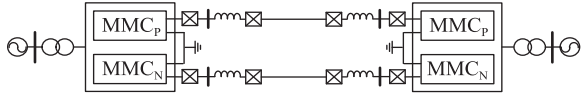


图1 柔性直流送出系统拓扑

Fig.1 Topology of flexible DC transmission system

### 1.1 故障暂态特性分析

当送出线路发生故障后,交流侧馈入的能量对直流故障影响很小,可以忽略不计<sup>[26-28]</sup>,只考虑故障前子模块电容所存储的能量。故障后健全极与故障极线路之间存在电磁耦合,进行解耦变换减小其影响<sup>[29]</sup>。通过变换矩阵将故障电气量解耦为线模分量和地模分量。

$$\begin{bmatrix} a_1 \\ a_0 \end{bmatrix} = \frac{\sqrt{2}}{2} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_p \\ a_n \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: $a_1$ 、 $a_0$ 分别为电气量的线模分量、地模分量; $a_p$ 、 $a_n$ 分别为正、负极电气量。

送出线路发生单极接地故障的概率较高。如图2所示,闭锁前MMC<sub>p</sub>子模块电容迅速放电。故障极对地电压迅速下降,健全极对地电压上升,故障电流迅速上升。

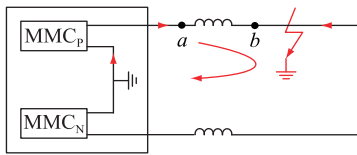


图2 单极接地故障

Fig.2 Single-pole ground fault

单极接地故障网络中,线模网络与地模网络在故障支路端口处呈现串联的关系。故障电压行波幅值表达式<sup>[30]</sup>为:

$$\begin{cases} U_{a1} = \frac{\sqrt{2}Z_1U_F}{Z_0 + Z_1 + 4R_F} \times \frac{Z_{M1} + L_1}{Z_{M1} + Z_{11} + L_1} \\ U_{b1} = \frac{\sqrt{2}Z_1}{Z_0 + Z_1 + 4R_F} U_F \end{cases} \quad (2)$$

式中: $U_{a1}$ 、 $U_{b1}$ 分别为 $a$ 、 $b$ 处的线模电压幅值; $Z_0$ 、 $Z_1$ 分别为等效波阻抗的地模分量和线模分量; $U_F$ 为故障电压幅值; $R_F$ 为过渡电阻; $Z_{M1}$ 、 $Z_{11}$ 、 $L_1$ 分别为MMC等效阻抗、线路等效阻抗、限流电抗器电感的线模分量。

直流线路发生双极短路故障类似于交流线路发生三相短路故障,较为严重,如图3所示,闭锁前MMC子模块电容迅速放电。故障极与健全极电压

变化趋势一致,故障电流迅速上升。

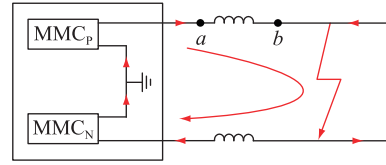


图3 双极短路故障

Fig.3 Bipolar short circuit fault

双极短路故障极间是对称的,因此只存在线模分量,没有地模分量。故障电压行波幅值表达式为:

$$\begin{cases} U_{a1} = \frac{\sqrt{2}Z_1U_F}{Z_1 + R_F} \times \frac{Z_{M1} + L_1}{Z_{M1} + Z_{11} + L_1} \\ U_{b1} = \frac{\sqrt{2}Z_1}{Z_1 + R_F} U_F \end{cases} \quad (3)$$

### 1.2 故障行波陡度与极性特征分析

图4为直流送出线路区内外故障示意。 $F_1$ 为区内故障, $F_2$ 、 $F_3$ 为区外故障。取送端换流站出口 $a$ 处、送出线路入口 $b$ 处、送出线路出口 $c$ 处、受端换流站入口 $d$ 处为电气量采样处。



图4 送出线路区内外故障

Fig.4 Fault inside and outside the transmission line zone

线路发生故障后,电压行波在线路传播的过程中会出现畸变和延迟<sup>[24]</sup>,则:

$$u(t) = U_F e^{\alpha t} \varepsilon\left(t - \frac{l}{v}\right) \quad (4)$$

式中: $u(t)$ 为线路电压; $\alpha$ 为衰减系数, $\alpha = \sqrt{RG}$ , $R$ 、 $G$ 分别为单位长度线路的电阻、电导; $l$ 为线路长度; $v$ 为传播速度, $v = 1/\sqrt{LC}$ , $L$ 、 $C$ 分别为单位长度线路的电感、电容; $\varepsilon(t)$ 为单位冲激函数。

因此,同一故障时间点,可明显区分出线路各采样处的故障行波陡度不同。表现如下: $F_1$ 故障前期, $a$ 处相比于 $b$ 处、 $d$ 处相比于 $c$ 处的故障行波陡度较小; $F_2$ 故障前期, $a$ 处相比于 $b$ 处的故障行波陡度较大, $d$ 处最小; $F_3$ 故障前期, $d$ 处相比于 $c$ 处的故障行波陡度较大, $a$ 处最小。

规定换流站流向母线、母线流向线路为行波参考正方向,在送出线路区内外故障情况下行波流向如图5所示,箭头方向为行波参考正方向。与实际流向(送端换流站流向受端换流站)相比,行波参考正方向与实际流向一致时极性为正,反之为负。由图5可知, $F_1$ 故障时,限流电抗器两侧采样处的故障行波极性是一致的,限流电抗器内侧采样处的故障

行波极性是不同的;而  $F_2$ 、 $F_3$ 故障时,限流电抗器两侧采样处的故障行波极性不同,限流电抗器内侧采样处的故障行波极性一致。

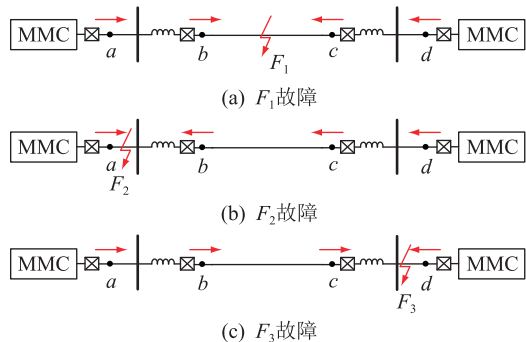


图5 区内外故障行波流向

Fig.5 Fault traveling wave direction inside and outside the transmission line zone

由上述分析可知,各采样处故障行波陡度与极性特征如表1所示。

表1 各采样处故障行波陡度与极性特征  
Table 1 Fault traveling wave steepness and polarity characteristics at the sampling points

运行工况	a处		b处		c处		d处	
	极性	陡度	极性	陡度	极性	陡度	极性	陡度
$F_1$ 故障	正	小	正	大	负	大	负	小
$F_2$ 故障	正	大	负	中	负	中	负	小
$F_3$ 故障	正	小	正	中	正	中	负	大

### 1.3 雷击干扰特性

长距离柔性直流输电线路容易遭受雷击,从而对线路保护造成影响。这种雷击干扰产生的电流信号多为负极性,可等效为受控电流源  $i_L$  与雷电通道波阻抗  $Z_L$  并联的电路模型<sup>[31]</sup>,如图6所示,其中  $Z_L$  取  $300 \Omega$ 。

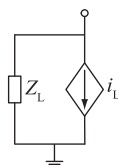


图6 雷击等效电路模型

Fig.6 Equivalent circuit model for lightning strikes

根据 IEC 的标准,采用最符合实际雷电流波形的负极性双指数雷电流模型,如式(5)所示。

$$i_L(t) = -AI_{\text{peak}}(e^{-t/\tau_1} - e^{-t/\tau_2}) \quad (5)$$

式中: $A$ 为雷电流幅值修正系数; $I_{\text{peak}}$ 为雷电流峰值; $\tau_1$ 、 $\tau_2$ 为雷电流波形时间常数。

直流线路遭受雷击干扰,行波信号曲线虽与单极接地故障相似,但是两者的衰减特性有显著的差别。两者都具有阶跃式特点,受雷击干扰的行波信

号特点与雷击等效电流源相类似,受雷击瞬间表现为陡峭的波头,数微秒内迅速衰落;而故障行波信号故障瞬间呈现上升趋势,不会过快衰减。因此,根据两者初始变化特性不同,可以准确识别雷击干扰。

## 2 保护方案

### 2.1 启动判据

当送出线路发生故障时,线路电压会明显下降,因此利用暂态电压变化量  $\Delta u$  的大小作为启动判据。正常运行状态下,在允许的范围内,电压波动一般不得超过额定值的 20%。由于健全极与故障极之间存在的耦合作用,考虑留一定的裕度,可靠系数取 1.2,则保护启动阈值  $\Delta u_{\text{set}}$  取 0.24。为保障线路保护的可靠性和速动性,取 1 ms 数据窗。以防因电压波动而导致保护频繁启动,采用逐差法实现快速启动判据:

$$\Delta u = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n \frac{u(t+n) - u(t)}{U_{\text{dc}}} > \Delta u_{\text{set}} \quad (6)$$

式中: $n$ 为 1 ms 时间窗内采样总数的一半; $u(t)$ 为采样电压; $t$ 为采样点编号; $U_{\text{dc}}$ 为额定直流电压。逐差法计算简便,充分利用暂态电压采样数据,具有一定的平滑去噪性能。

### 2.2 区内外故障判别

结合柔性直流送出线路故障特性分析与表1所示各采样处故障行波陡度与极性特征可知,可以利用区内外故障下各采样处故障电压行波陡度和极性的不同判断送出线路故障位置。

设  $u_a(t)$ 、 $u_b(t)$ 、 $u_c(t)$ 、 $u_d(t)$  分别为  $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $d$  处线模电压; $G_1$ 、 $G_2$  分别为  $b$  处与  $a$  处、 $c$  处与  $d$  处线模电压幅值比,以表现电压行波陡度; $S_1$ 、 $S_2$  分别为  $b$ 、 $c$  处电压行波符号函数值,以表现电压行波极性; $G_{\text{set}}$  为电压行波陡度门限值。

$$G_1 = |u_b(t)/u_a(t)| \quad (7)$$

$$G_2 = |u_c(t)/u_d(t)| \quad (8)$$

$$S_1 = \text{sgn}(u_b(t)) \quad (9)$$

$$S_2 = \text{sgn}(u_c(t)) \quad (10)$$

$$G_1 < G_{\text{set}} \text{ 或 } G_2 < G_{\text{set}} \quad (11)$$

对于区内故障,限流电抗器两侧的线模电压幅值比  $G_1$ 、 $G_2$  小于 1,考虑留一定裕度,  $G_{\text{set}}$  取 0.8。若符合式(11)所示条件,则初步判断为区内发生故障。为规避电压波动和偶然误差导致保护误动作的情况,提高线路保护的可靠性,采用双判据识别区内外故障。以陡度特征构造主判据,以极性特征构造辅助判据。计  $M_1$ 、 $M_2$  为一个数据窗内  $G_1$ 、 $G_2$



满足式(11)的采样数据个数,  $M_{set}$  为区内故障阈值。可得区内故障判据如下:

$$\begin{cases} M_1 > M_{set} \text{ 或 } M_2 > M_{set} \\ S_1 = -1 \text{ 或 } S_2 = -1 \end{cases} \quad (12)$$

理想区内故障情况下,  $M_1$  或  $M_2$  大于0即可,防止误判并兼顾保护速动性,  $M_{set}$  取1 ms 时间窗内采样总数的一半;且此刻限流电抗器内侧采样电压行波  $u_b(t)$  或  $u_c(t)$  存在负极性,即  $S_1$  或  $S_2$  为-1。

### 2.3 故障选极

根据1.1节、1.2节分析可知,当送出线路故障发生后,对于单极接地故障,故障极的电压幅值变化程度明显大于健全极;而对于双极短路故障,故障极与健全极电压幅值变化程度相近。因此,可以利用线路故障极与健全极电压幅值变化程度的差异进行故障极的判定。

设  $u_{b,p}(t)$ 、 $u_{b,n}(t)$  分别为  $b$  处的正、负极电压;  $u_{c,p}(t)$ 、 $u_{c,n}(t)$  分别为  $c$  处的正、负极电压;  $L_1$ 、 $L_2$  分别为  $b$ 、 $c$  处正负极电压幅值比的最小值;  $H_1$ 、 $H_2$  分别为  $b$ 、 $c$  处正负极电压幅值比的最大值;  $k_L$ 、 $k_H$  为故障选极阈值,且  $k_L$ 、 $k_H$  互为倒数。 $L_1$ 、 $L_2$ 、 $H_1$ 、 $H_2$  计算见式(13)一式(16),构造式(17)所示故障识别判据。

$$L_1 = \min(|u_{b,p}(t)/u_{b,n}(t)|) \quad (13)$$

$$L_2 = \min(|u_{c,p}(t)/u_{c,n}(t)|) \quad (14)$$

$$H_1 = \max(|u_{b,p}(t)/u_{b,n}(t)|) \quad (15)$$

$$H_2 = \max(|u_{c,p}(t)/u_{c,n}(t)|) \quad (16)$$

$$\begin{cases} L_1 < k_L \text{ 或 } L_2 < k_L & \text{正极接地故障} \\ k_L \leq L_1 \leq H_1 \leq k_H \text{ 或 } k_L \leq L_2 \leq H_2 \leq k_H & \text{双极短路故障} \\ H_1 > k_H \text{ 或 } H_2 > k_H & \text{负极接地故障} \end{cases} \quad (17)$$

若发生单极接地故障,极间电压是一定的,故障极电压幅值跌落,健全极电压幅值上升。对于正极接地故障,  $L_1$ 、 $L_2$  小于1;对于负极接地故障,  $H_1$ 、 $H_2$  大于1。若发生双极短路故障,正负极电压幅值跌落,变化程度接近,  $L_1$ 、 $L_2$ 、 $H_1$ 、 $H_2$  值约等于1。综合考虑电压波动和健全极与故障极之间电磁耦合的影响,设定阈值  $k_L = 0.5$ ,  $k_H = 2$ 。

### 2.4 雷击干扰识别

考虑到故障与雷击干扰的初始变化特性和继电保护的基本要求,选取正常运行状态下额定线模电流幅值  $I_{del}$  的1.2倍作为雷击干扰判别阈值,即  $I_{set} = 1.2I_{del}$ ,判据为式(8),其中  $i(t)$  为线路电流。

$$\begin{cases} \max(i(t)) \geq I_{set} & \text{单极接地故障} \\ \max(i(t)) < I_{set} & \text{雷击干扰} \end{cases} \quad (18)$$

### 2.5 保护方案流程

根据2.1—2.4节内容分析,柔性直流送出线路快速保护方案流程如图7所示。首先,采集电流电压数据并记录;接着,检测启动判据是否生效;若满足启动判据条件,进入雷击干扰判别;若发生故障,区内外故障识别判据生效,如果符合区内故障的条件,进入故障类型判断阶段;最后,根据故障类型判定结果启动保护。

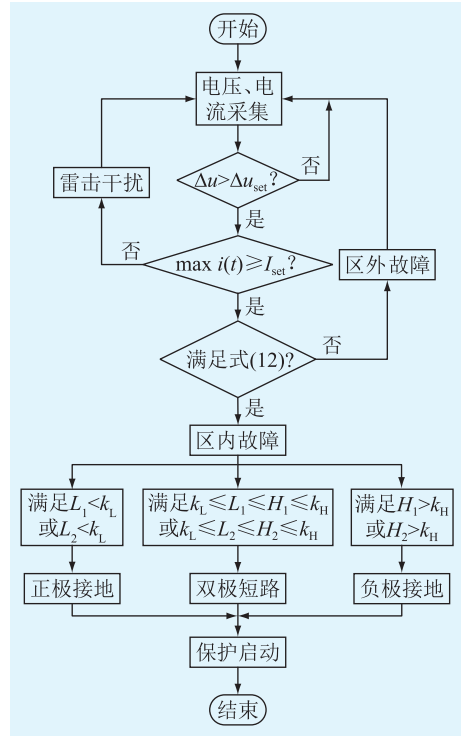


图7 保护方案流程

Fig.7 Flow chart of protection scheme

### 3 仿真实验

利用PSCAD/EMTDC仿真软件搭建图1所示柔性直流送出系统模型,主要参数设置如表2所示。设置仿真总时长为3.0 s,采样频率为20 kHz,仿真步长为50 μs,故障发生时间为2.5 s。文中单极接地故障以正极接地故障为例。

表2 系统主要参数

Table 2 Main parameters of system

参数	数值	参数	数值
额定功率/MW	750	桥臂阻抗/Ω	0.36
额定电压/kV	±500	桥臂电感/mH	100
子模块数目	200	限流电抗器电感/mH	150
子模块电容/mF	15		

#### 3.1 区内故障仿真

当送出线路区内距送端换流站5 km、100 km、195 km处发生单极金属性接地故障时,仿真结果如

图8—图10所示。仿真2.5 s时送出线路发生故障,电压幅值比出现跌落,在不同位置发生故障时,线路电压行波采样信号幅值相比发生跌落的时刻有一定延时。在故障后1 ms内,由图8可知, $b$ 处与 $a$ 处、 $c$ 处与 $d$ 处的线模电压幅值比小于陡度阈值,显然满足式(11)的采样数据个数大于1 ms时间窗内采样总数的一半;且由图9可知,此刻电压行波 $u_b(t)$ 、 $u_c(t)$ 符号函数值一正一负,即 $b$ 、 $c$ 处电压行波极性不同,与式(12)区内故障判据吻合,保护判定为区内故障。由图10可知,故障后1 ms内, $b$ 、 $c$ 处正负极电压幅值比最小值小于故障选极阈值,符合式(17)故障识别判据中的正极接地故障判据,保护识别为区内正极接地故障。

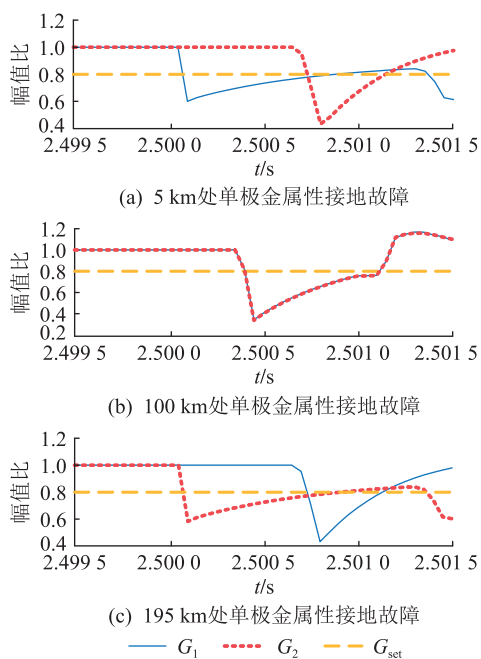


图8 区内单极接地故障线模电压幅值比  
Fig.8 Amplitude ratio of line-mode voltage of single-pole ground fault inside the zone

同样,当区内距送端换流站5 km、100 km、195 km处发生双极短路故障时,仿真结果如图11—图13所示。可以看出, $b$ 处与 $a$ 处、 $c$ 处与 $d$ 处的线模电压幅值比满足式(11)的采样数据个数超过1 ms时间窗内采样总数的一半,且 $b$ 、 $c$ 处电压行波存在负极性,符合式(12)区内故障判据; $b$ 、 $c$ 处正负极电压幅值比在0.5~2内,满足式(17)双极短路故障条件,保护判定故障类型为区内双极短路故障。

为进一步验证故障类型识别准确性,以区内距送端换流站100 km处发生正极金属性接地、负极金属性接地、双极短路故障为例,仿真结果如图14所示。可见,图14(a)中电压幅值比在阈值以下,图14(b)中电压幅值比在2以上,图14(c)中电压幅值

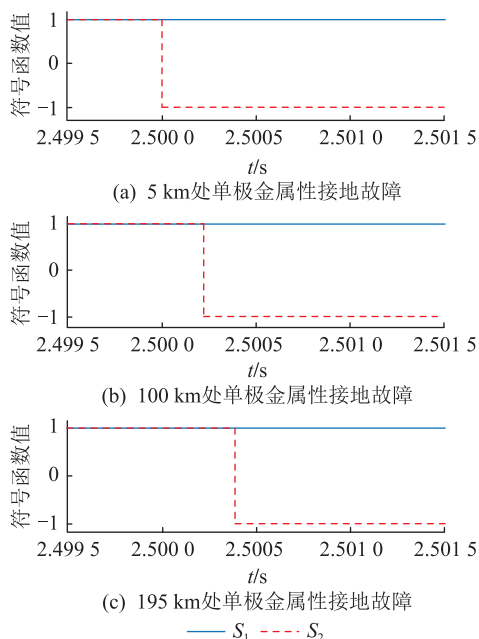


图9 区内单极接地故障符号函数值  
Fig.9 Symbolic function value of single-pole ground fault inside the zone

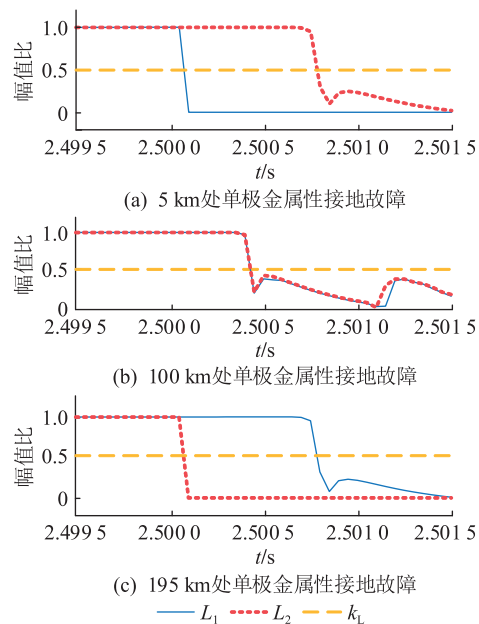


图10 区内单极接地故障正负极电压幅值比  
Fig.10 Amplitude ratio of positive and negative voltage of single-pole ground fault inside the zone

比在0.5~2内,与式(17)故障识别判据一致,因此故障选极判据能准确识别出故障类型。

### 3.2 区外故障仿真

当送出线路 $F_2$ 、 $F_3$ 处发生区外故障时,仿真结果见图15—图18。可得, $b$ 处与 $a$ 处、 $c$ 处与 $d$ 处的线模电压幅值比大于阈值,且 $b$ 、 $c$ 处电压行波符号函数值相同,不满足式(12)区内故障判定条件,保护不动作,保护方案能够可靠识别出区外故障。

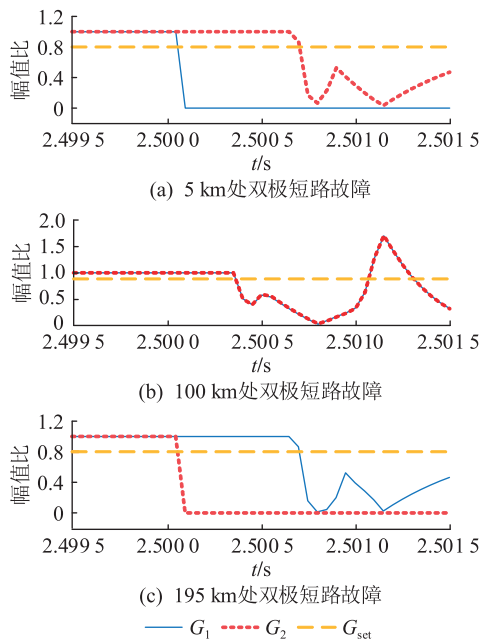


图 11 区内双极短路故障线模电压幅值比

Fig.11 Amplitude ratio of line-mode voltage of bipolar short circuit fault inside the zone

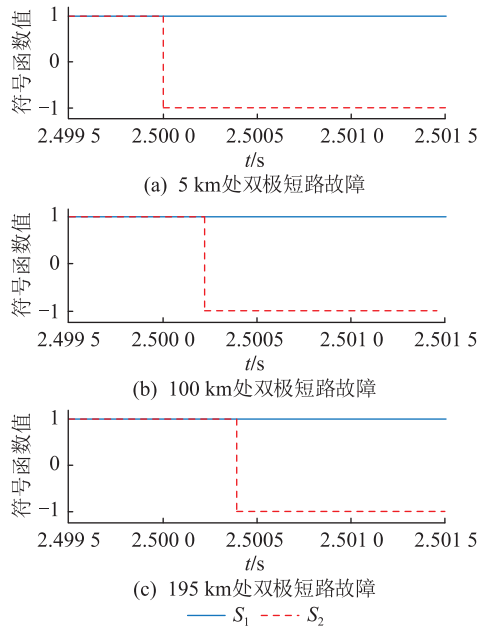


图 12 区内双极短路故障符号函数值

Fig.12 Symbolic function value of bipolar short circuit fault inside the zone

3.3 雷击干扰仿真

采用 IEC 标准  $1.2/50 \mu s$  负极性双指数雷电流模型,雷电流幅值为 50 kA,雷击时刻为 2.5 s。

在送出线路距送端换流站 5 km、100 km、195 km 的位置施加雷击干扰,与相应位置单极接地故障电流仿真结果进行对比,具体如图 19 所示。可知,雷击干扰下线路电流先出现跌落然后回升正常,而单极接地故障线路电流呈现上升趋势,阈值  $I_{set}$  能明

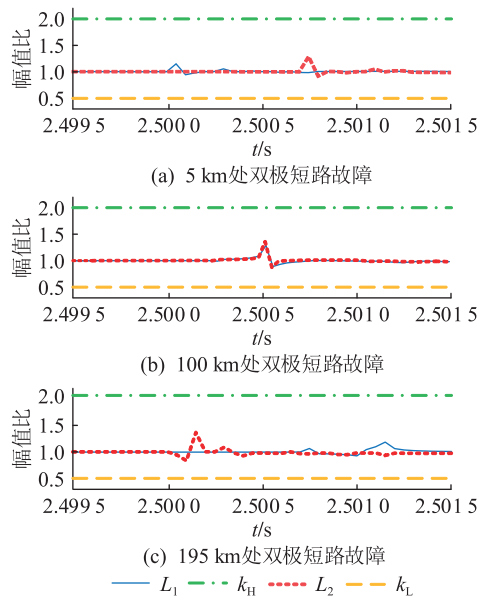


图 13 区内双极短路故障正负极电压幅值比

Fig.13 Amplitude ratio of positive and negative voltage of bipolar short circuit fault inside the zone

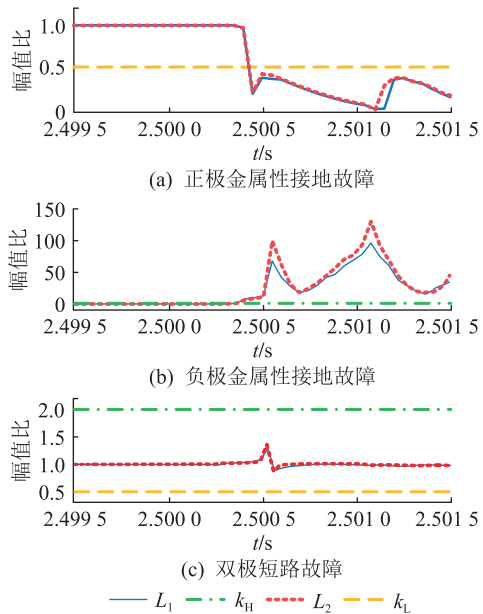


图 14 区内不同故障类型仿真

Fig.14 Simulation of different fault types inside the zone

显识别出区内雷击干扰和单极接地故障。

区外雷击干扰与单极接地故障电流仿真结果对比如图 20 所示。可知,区外雷击干扰下线路电流变化很小,单极接地故障线路电流为上升趋势,阈值  $I_{set}$  能明显区分出雷击干扰和单极接地故障。

以上仿真结果验证了雷击识别判据的有效性,能够准确排除雷击干扰的影响。

3.4 其他干扰仿真

文中保护方案只需要单端电气量,不用考虑线路分布电容的影响。为验证过渡电阻对文中保护

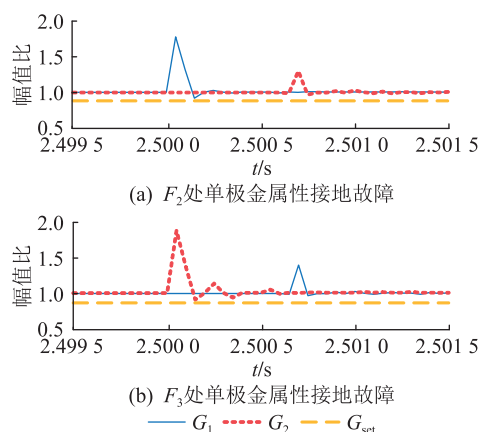


图 15 区外单极接地故障线模电压幅值比  
Fig.15 Amplitude ratio of line-mode voltage of single-pole ground fault outside the zone

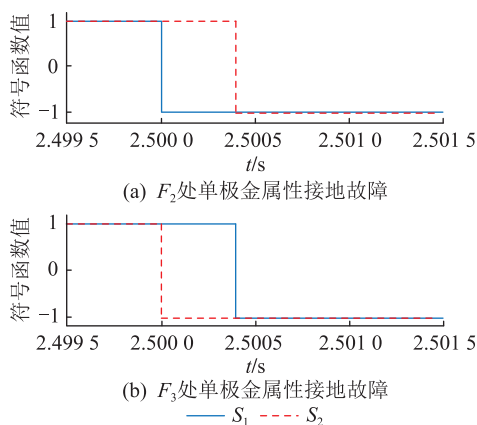


图 16 区外单极接地故障符号函数值  
Fig.16 Symbolic function value of single-pole ground fault outside the zone

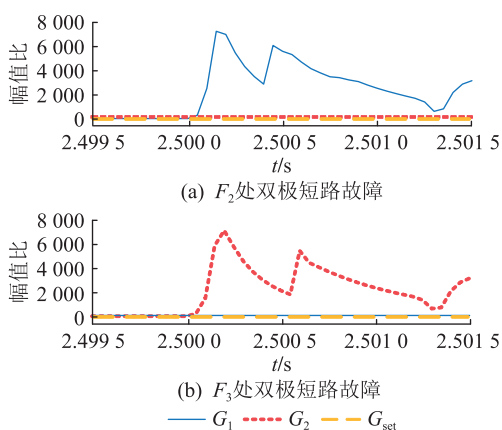


图 17 区外双极短路故障线模电压幅值比  
Fig.17 Amplitude ratio of line-mode voltage of bipolar short circuit fault outside the zone

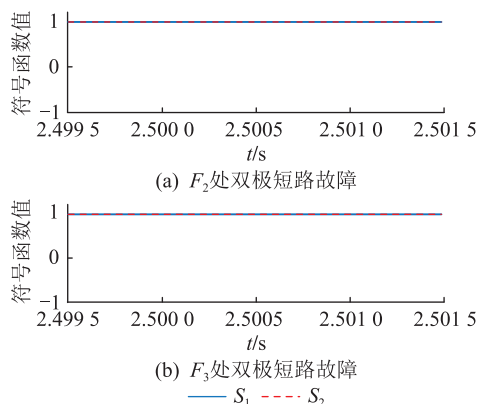


图 18 区外双极短路故障符号函数值  
Fig.18 Symbolic function value of bipolar short circuit fault outside the zone

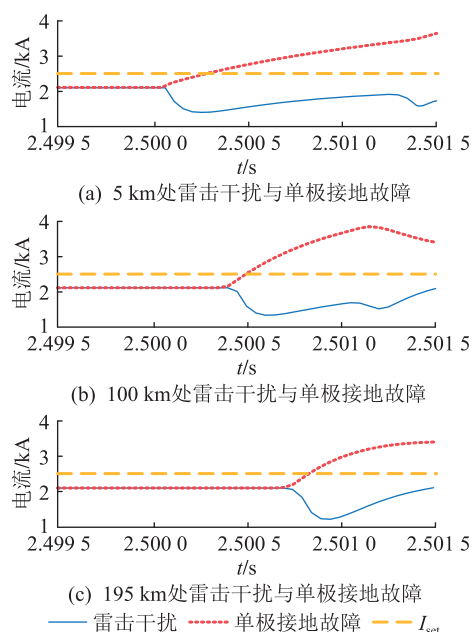


图 19 区内雷击干扰与单极故障线模电流  
Fig.19 Line-mode current of lightning disturbance inside the zone and single-pole ground fault

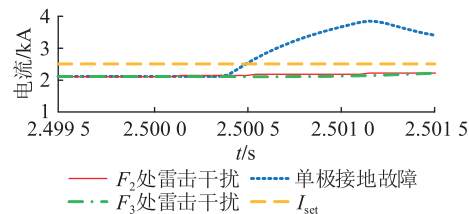


图 20 区外雷击干扰与单极故障线模电流  
Fig.20 Line-mode current of lightning disturbance outside the zone and single-pole ground fault

方案的影响,在区内外不同故障类型情况下分别设置  $0.01 \Omega$ 、 $50 \Omega$ 、 $150 \Omega$  过渡电阻进行仿真验证,判别结果如表 3 所示。

由表 3 可知,该保护方案具有良好的耐受过渡

电阻的能力。

为验证限流电抗器电感大小对文中保护方案的影响,在区内外不同故障类型下分别设置电感  $50 \text{ mH}$ 、 $150 \text{ mH}$ 、 $200 \text{ mH}$  进行仿真验证,判别结果如表 4 所示。

表3 不同故障不同过渡电阻下仿真判别结果

Table 3 Simulation discrimination results for different faults with different transition resistances

故障位置	故障类型	过渡电阻/ $\Omega$	判定结果	是否动作
$F_1$	正极接地	0.01	区内正极接地	是
		50	区内正极接地	是
		150	区内正极接地	是
	负极接地	0.01	区内负极接地	是
		50	区内负极接地	是
		150	区内负极接地	是
$F_2$	双极短路	0.01	区内双极短路	是
		50	区内双极短路	是
		150	区内双极短路	是
	正极接地	0.01	区外故障	否
		50	区外故障	否
		150	区外故障	否
双极短路	0.01	区外故障	否	
	50	区外故障	否	
	150	区外故障	否	

表4 不同故障不同限流电抗器电感下仿真判别结果

Table 4 Simulation discrimination results for different faults with different current limiting reactors

故障位置	故障类型	电感/ $mH$	判定结果	是否动作
$F_1$	正极接地	50	区内正极接地	是
		150	区内正极接地	是
		200	区内正极接地	是
	双极短路	50	区内双极短路	是
		150	区内双极短路	是
		200	区内双极短路	是
$F_2$	正极接地	50	区外故障	否
		150	区外故障	否
		200	区外故障	否
	双极短路	50	区外故障	否
		150	区外故障	否
		200	区外故障	否

由表4可知,该保护方案在限流电抗器电感为50~200 mH时均能准确判别故障类型。

综上所述,所提保护方案具有较好的性能,能够准确快速地判别故障类型,排除雷击干扰,不受分布式电容的影响,具有良好的抗过渡电阻能力。

#### 4 结语

文中研究了柔性直流线路故障电压行波暂态特性,发现限流电抗器两侧故障电压行波陡度与极性特征不同;提出一种基于电压行波陡度的柔性直流送出线路快速保护方案,通过限流电抗器两侧故障电压行波陡度与极性的差异划分区内外故障;利用故障极与健全极电压行波变化程度的不同进行故障极判定;利用雷击电流行波衰减快的特性识别

雷击干扰。该保护方案利用限流电抗器对突变量的抑制作用,扩大暂态信息量提取范围,保障了保护的可靠性和灵敏性,计算简单,工程实现方便,保护速动性高,能够识别雷击干扰,具有一定的耐受过渡电阻和抗干扰能力。

文中所提保护方案适用于含限流电抗器的双端或多端柔性直流线路保护,后续将进一步研究较复杂结构的柔性直流系统故障暂态特性以及保护方案。

#### 参考文献:

- [1] 刘云. 巴西高压直流输电工程特点分析及启示[J]. 电网技术, 2021, 45(8): 3340-3348.  
LIU Yun. Analysis on Brazilian HVDC projects situation and its inspiration[J]. Power System Technology, 2021, 45(8): 3340-3348.
- [2] 文福拴, 鲁刚, 黄杰. 面向碳达峰、碳中和的综合能源系统[J]. 全球能源互联网, 2022, 5(2): 116-117.  
WEN Fuquan, LU Gang, HUANG Jie. Integrated energy system towards carbon peak and neutrality targets[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2022, 5(2): 116-117.
- [3] 袁伟, 王彩霞, 李琼慧, 等. 面向新能源大规模消纳的大容量储能多分区两阶段优化配置方法研究[J]. 全球能源互联网, 2021, 4(4): 393-400.  
YUAN Wei, WANG Caixia, LI Qionghui, et al. Multi-area two-stage optimal allocation method of large-scale energy storage for renewable energy consumption[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2021, 4(4): 393-400.
- [4] 张小平, 鲁宗相, 马世英. 能源转型中的电力系统规划关键技术及案例研究[J]. 全球能源互联网, 2021, 4(4): 321-322.  
ZHANG Xiaoping, LU Zongxiang, MA Shiyang. Key technologies and case studies of power system planning in energy transition[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2021, 4(4): 321-322.
- [5] 张成泉, 邹贵彬, 张烁, 等. 适用于多端柔性直流电网的潮流控制器[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(20): 32-40.  
ZHANG Chengquan, ZOU Guibin, ZHANG Shuo, et al. A current flow controller suitable for MTDC grids[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(20): 32-40.
- [6] 张鑫宇, 樊艳芳, 马健, 等. 基于拟合电流斜率特性的柔性直流配电线路纵联保护方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(18): 128-136.  
ZHANG Xinyu, FAN Yanfang, MA Jian, et al. Pilot protection method for flexible DC distribution lines based on fitted current slope characteristics[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(18): 128-136.
- [7] HE Y Y, ZHENG X D, TAI N L, et al. A DC line protection scheme for MMC-based DC grids based on AC/DC transient information[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2020, 35(6): 2800-2811.
- [8] XU Y, LIU J Y, FU Y. Fault-line selection and fault-type recognition in DC systems based on graph theory[J]. Protection and



- Control of Modern Power Systems, 2018, 3(1):1-10.
- [9] 陈争光,周泽昕,王兴国,等. 混合多端直流输电系统线路保护方案研究[J]. 电网技术, 2019, 43(7):2617-2622.  
CHEN Zhengguang, ZHOU Zexin, WANG Xingguo, et al. Research on protection scheme of hybrid multi-terminal DC transmission lines [J]. Power System Technology, 2019, 43(7):2617-2622.
- [10] 杨志勇,杨炳元,任永峰,等. 基于单端高频电流量的 MMC-MTDC 输电线路保护方案[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(14):151-160.  
YANG Zhiyong, YANG Bingyuan, REN Yongfeng, et al. Transmission line protection scheme of MMC-MTDC based on single terminal high frequency current [J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(14):151-160.
- [11] 李振兴,余双喜,徐浩,等. 基于杰卡德相似度一体化判据的柔直线路纵联保护[J]. 电力工程技术, 2023, 42(2):94-102.  
LI Zhenxing, SHE Shuangxi, XU Hao, et al. Pilot protection of flexible DC line based on Jaccard similarity integration criterion [J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42(2):94-102.
- [12] LIU J, TAI N L, FAN C J. Transient-voltage-based protection scheme for DC line faults in the multiterminal VSC-HVDC system [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, 32(3):1483-1494.
- [13] 何佳伟,李斌,李晔,等. 多端柔性直流电网快速方向纵联保护方案[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(23):6878-6887, 7078.  
HE Jiawei, LI Bin, LI Ye, et al. A fast directional pilot protection scheme for the MMC-based MTDC grid [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(23):6878-6887, 7078.
- [14] TANG L X, DONG X Z, LUO S X, et al. A new differential protection of transmission line based on equivalent travelling wave [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, 32(3):1359-1369.
- [15] ZHANG S, ZOU G B, WANG C J, et al. A non-unit boundary protection of DC line for MMC-MTDC grids [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2020, 116:105538.
- [16] 张韵琦,丛伟,张玉玺. 基于初始电压行波频域衰减速率的 MMC-HVDC 线路保护方案[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(12):143-155.  
ZHANG Yunqi, CONG Wei, ZHANG Yuxi. MMC-HVDC line protection scheme based on frequency-domain attenuation rate of initial voltage traveling wave [J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(12):143-155.
- [17] 陈鑫全,李海锋,顾广坤,等. 基于时域电压比的高压直流输电线路暂态保护方案[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(22):62-69.  
CHEN Xinquan, LI Haifeng, GU Guangkun, et al. Transient protection scheme of HVDC transmission line based on time-domain voltage ratio [J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(22):62-69.
- [18] 王艳婷,张保会,范新凯. 柔性直流电网架空线路快速保护方案[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(21):13-19.  
WANG Yanting, ZHANG Baohui, FAN Xinkai. Fast protection scheme for overhead transmission lines of VSC-based HVDC grid [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(21):13-19.
- [19] JIAO Z B, WANG Z, WANG X B, et al. Protection schemes for distribution lines in DC power grid [C]//2015 IEEE Innovative Smart Grid Technologies-Asia (ISGT ASIA). Bangkok, Thailand. IEEE, 2016:1-6.
- [20] TONG N, LIN X N, LI Y, et al. Local measurement-based ultra-high-speed main protection for long distance VSC-MTDC [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2019, 34(1):353-364.
- [21] 宋国兵,王婷,张保会,等. 利用电力电子装置的探测式故障识别技术分析展望[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(20):173-183.  
SONG Guobing, WANG Ting, ZHANG Baohui, et al. Analysis and prospect of detective fault identification technologies using power electronic device [J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(20):173-183.
- [22] 宋国兵,王婷,张晨浩,等. 利用健全极 MMC 注入特征信号的直流线路故障性质判别方法[J]. 电工技术学报, 2019, 34(5):994-1003.  
SONG Guobing, WANG Ting, ZHANG Chenhao, et al. DC line fault identification based on characteristic signal injection using the MMC of sound pole [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(5):994-1003.
- [23] 贾科,李论,宣振文,等. 基于扰动注入的柔性直流配电网主动故障定位及其仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(4):99-106.  
JIA Ke, LI Lun, XUAN Zhenwen, et al. Study on fault location method and simulation for VSC-DC distribution network based on disturbance injection [J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(4):99-106.
- [24] 汤兰西,董新洲,施慎行,等. 柔性直流电网线路超高速行波保护原理与实现[J]. 电网技术, 2018, 42(10):3176-3186.  
TANG Lanxi, DONG Xinzhou, SHI Shenxing, et al. Principle and implementation of ultra-high-speed travelling wave based protection for transmission line of flexible HVDC grid [J]. Power System Technology, 2018, 42(10):3176-3186.
- [25] 谢仲润,邹贵彬,杜肖功,等. 基于真双极的 MTDC 电网直流线路快速保护[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(6):1906-1915.  
XIE Zhongrun, ZOU Guibin, DU Xiaogong, et al. Fast DC lines protection for symmetrical bipolar based MTDC grid [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(6):1906-1915.
- [26] 杨海倩,王玮,荆龙,等. MMC-HVDC 系统直流侧故障暂态特性分析[J]. 电网技术, 2016, 40(1):40-46.  
YANG Haiqian, WANG Wei, JING Long, et al. Analysis on transient characteristic of DC transmission line fault in MMC

- based HVDC transmission system[J]. Power System Technology, 2016, 40(1):40-46.
- [27] 段国朝,王跃,尹太元,等. 模块化多电平变流器直流短路故障电流计算[J]. 电网技术, 2018, 42(7):2145-2152.  
DUAN Guozhao, WANG Yue, YIN Taiyuan, et al. DC short circuit current calculation for modular multilevel converter[J]. Power System Technology, 2018, 42(7):2145-2152.
- [28] 王威儒,贺之渊,李国庆,等. 含交流影响的 MMC-HVDC 直流故障电流递推计算方法[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(S1):313-320.  
WANG Weiru, HE Zhiyuan, LI Guoqing, et al. Recursive calculation method of MMC-HVDC DC fault current with AC effect[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(S1):313-320.
- [29] 李爱民,蔡泽祥,李晓华. 直流线路行波传播特性的解析[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(25):94-100.  
LI Aimin, CAI Zexiang, LI Xiaohua. Study on the propagation characteristics of traveling waves in HVDC transmission lines on the basis of analytical method[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(25):94-100.
- [30] 王艳婷,范新凯,张保会. 柔性直流电网行波保护解析分析与整定计算[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(11):3201-3212.  
WANG Yanting, FAN Xinkai, ZHANG Baohui. The analytical analysis and protection setting of traveling wave protection in VSC-HVDC grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(11):3201-3212.
- [31] 顾垚彬,宋国兵,郭安祥,等. 针对直流线路行波保护的雷击识别方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(13):3837-3845, 4024.  
GU Yaobin, SONG Guobing, GUO Anxiang, et al. A lightning recognition method for DC line traveling-wave protection of HVDC[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(13):3837-3845, 4024.

---

作者简介:



高正创

高正创(1994),男,硕士在读,研究方向为柔性直流输电线路保护(E-mail:2575298893@qq.com);

李凤婷(1965),女,博士,教授,博士生导师,研究方向为电力系统继电保护与控制、可再生能源并网技术等;

解超(1987),男,博士,副教授,研究方向为电力系统继电保护与可再生能源并网技术。

## Fast protection scheme for flexible DC transmission line based on voltage traveling wave steepness

GAO Zhengchuang, LI Fengting, XIE Chao, YIN Chunya

(School of Electrical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830017, China)

**Abstract:** Flexible DC technology has revolutionary significance in flexibly solving the problem of high proportion of new energy consumption. Due to the vulnerability of high-ratio power electronic equipment and the difficulty in extracting fault information, traditional line protection schemes can no longer be reliably adapted to the flexible DC transmission system. A rapid protection scheme for flexible DC transmission lines based on voltage traveling wave steepness is proposed in this paper. By analyzing the transient characteristics of DC line faults, and utilizing the differences in the steepness and polarity of fault voltage traveling waves on both sides of the current-limiting reactor, the range of effective transient information extraction is increased, and the fault identification inside or outside the region is realized. The faults are classified by utilizing the significant difference in the degree of voltage traveling wave variation between the faulty and sound poles. Lightning interference is considered and a rapid identification method is proposed by using its initial change characteristics. Finally, the performance of the protection scheme under various influencing factors is verified by simulation, which can identify faults quickly and reliably and has good sensitivity and anti-interference ability.

**Keywords:** flexible DC; transient information; voltage traveling wave steepness; voltage traveling wave polarity; lightning disturbance; sensitivity

(编辑 方晶)